心理科学进展 2020, Vol. 28, No. 7, 1029–1041
Advances in Psychological Science DOI: 10.3724/SP.J.1042.2020.01029

·研究方法(Research Method)·

瞳孔是心灵的窗口吗？——瞳孔在心理学研究中的应用及测量*

杨晓梦 王福兴 王燕青 赵婷婷 高春颖 胡祥恩
(华中师范大学心理学院, 武汉 430079)

摘 要 瞳孔大小是眼动研究中一个重要的参数指标，在一定程度上能够反映人的心理活动并影响他人的心理与行为。一方面，瞳孔变化受到自上而下的知觉与注意、情绪与动机、心理努力、社会认知与发展等因素的影响，另一方面，大瞳孔能引起他人更多的积极评价和积极行为。瞳孔的神经机制(蓝斑–去甲肾上腺素系统)和自适应增益理论解释了瞳孔与心理之间存在紧密联系的原因。瞳孔测量(pupillometry)作为一种有效的眼动追踪方法有助于理解瞳孔与心理的关系，研究者在测量瞳孔时需要关注无关变量(如亮度、注视位置)，原始数据处理(如基线校正、眨眼处理)及瞳孔指标选取(如瞳孔直径、震颤频率)等问题，未来研究应继续探讨瞳孔与其他心理之间的关系，并探索更有效地处理和使用瞳孔指标的方法。

关键词 瞳孔；瞳孔测量；自上而下加工；神经机制；自适应增益理论
分类号 B841

存乎人者，莫良于眸子。眸子不能掩其恶。胸中正，则眸子了焉；胸中不正，则眸子眊焉。听其言也，观其眸子，人焉廋哉？

——《孟子·离娄上·十五》

对瞳孔与心理关系的探讨自古有之，但采用心理学方法进行科学研究仅有半个多世纪的历史(Laeng, Sirois, & Gredebäck, 2012)。虽然 Kuntz 在1929年就曾提出愉悦和恐惧的情绪通常伴随瞳孔扩张(转引自：Hess & Polt, 1960)，但缺乏实证支持。直到上个世纪60年代初，Hess 和 Polt (1960) 让6名被试观看一系列图片：婴儿、抱着孩子的母亲、半裸男性、半裸女性和风景，同时记录瞳孔变化，发现瞳孔变化受个体兴趣的影响。大部分研究者将此研究作为瞳孔测量在心理学研究中应用的开端(Mathôt, 2018; Sylvain & Julie, 2014)，之后 Hess 又把瞳孔作为情绪、动机、味觉偏好、音乐偏好、态度及其转变等心理变量的指标并进行了一系列研究，认为瞳孔变化是一个新兴的反映人类心理的敏感指标，这引起了瞳孔测量研究的热潮(Goldwater, 1972; Hess, 1965)。但是，由于 Hess 的研究设计不够严谨，部分结果无法重复，其研究结果受到了质疑(Janisse, 1973)。到了上世纪70、80年代，以 Daniel Kahneman 和 Jackson Beatty 为代表的心理学家发现瞳孔还与记忆和心理努力等高级认知活动有关(参见：Laeng et al., 2012)。随着眼动技术的发展，瞳孔数据更加容易获得也更可靠；实验条件控制越来越严格，瞳孔变化可以反映心理加工这一事实再次引起了研究者们的兴趣，瞳孔与心理之间的关系也越来越受到研究者的关注(Mathôt, 2018)。

本综述整理并介绍了近期心理学领域有关瞳孔在心理学研究中的应用，包括心理因素如何影响个体的瞳孔变化，瞳孔如何影响他人心理与行为，分析瞳孔变化的神经机制及相关理论，最后归纳出如何更有效地测量瞳孔的方法，以期为研

收稿日期：2019-06-03
* 国家自然科学基金面上项目(#31771236)和中央高校基本科研业务费(CCNU19TS040)资助。
通信作者：王福兴, E-mail: fxwang@mail.ccnu.edu.cn
胡祥恩, E-mail: xiangenhu@mail.ccnu.edu.cn

究者测量瞳孔提供借鉴和参考。

1 心理因素是否影响个体的瞳孔变化？

研究者通常采用任务诱发的瞳孔变化(task-evoked pupil responses, TEPRs)来研究某一心理因素对瞳孔大小变化的影响，将外显的瞳孔变化作为内部心理活动的指标之一(Beatty, 1982)。影响个体瞳孔变化的因素主要涉及知觉与注意、情绪与动机、心理努力和社会认知与发展四个方面。

1.1 知觉与注意

传统观点认为瞳孔光反射(pupil light response, PLR)是简单的生理反应，即在暗环境下瞳孔扩张，在亮环境下瞳孔缩小(Loewenfeld, 1958)。随着研究的深入，研究者发现瞳孔变化还受到主观的亮度知觉的影响。尽管相比于物理亮度对瞳孔变化的影响(变化范围约 2~8 mm) (Loewenfeld, 1993)，亮度知觉引发的瞳孔变化很微弱(直径变化小于 0.5 mm) (Beatty, 1982; Beatty & Lucero-Wagoner, 2000; Sylvain & Julie, 2014)，但这一现象仍然引起了研究者的兴趣。研究发现，即使被试看到相同物理亮度的图片，被试主观认为是亮的图片(如：太阳、亮度错觉)引起的瞳孔收缩更明显(Laeng & Endestad, 2012; Naber & Nakayama, 2013)，甚至发现想象一张较亮的图片比想象一张较暗的图片时的瞳孔更小，听到一个带有明亮含义的词(如：白天)比听到带有中性含义(如：房子)或暗含义(如：晚上)词语后的瞳孔更小(Laeng & Sulutvedt, 2014; Mathôt, Grainger, & Strijkers, 2017)。说明瞳孔变化不单纯是生理性条件反射，还受到高级认知加工的影响，无论是物理光刺激还是亮度知觉都能引起瞳孔收缩(Mathôt, 2018)。

此外，研究还发现当大脑对信息进行选择性注意时也会引起瞳孔变化。例如，在 Mathôt, Dalmaijer, Grainger 和 van der Stigchel (2014)的研究中，屏幕被左右分成亮、暗两边，要求被试一直注视屏幕中心点，接着左右两侧随机呈现线索来吸引被试的注意，结果发现在线索呈现后的 476~893ms，当线索出现在亮侧时被试的瞳孔更小，出现了“瞳孔线索效应” (pupillary cuing effect); 该效应也在其他研究中被证实(Binda & Murray, 2015; Binda, Pereverzeva, & Murray, 2013; Mathôt, Linden, Grainger, & Vitu, 2015; Mathôt & van der Stigchel, 2015)。这些研究表明，虽然进入被试瞳孔的物理亮度恒定，但线索引导的注意也能诱发类似瞳孔光反射的瞳孔变化。另外，注意网络的三个成分——警觉网络(alerting network)、朝向网络(orienting network)和执行控制网络(executive monitoring network)也会引起不同时间和强度的瞳孔扩张。例如，Geva, Zivan, Warsha 和 Olchik (2013)采用注意网络任务(attention network task, ANT)来比较注意网络的三个成分差异，并记录瞳孔变化，结果发现线索呈现后 300 ms 出现瞳孔扩张(警觉网络)；相比于没有空间信息的线索，有空间信息的线索能引起瞳孔更早的扩张(朝向网络)；并且执行控制网络引起的瞳孔变化主要受到心理努力的影响(见 1.3 心理努力)。因此，瞳孔变化或许可以作为注意网络功能的指标之一(Geva et al., 2013; Petersen & Posner, 2012; Wang, Boehnke, Itti, & Munoz, 2014)。

1.2 情绪与动机

情绪唤醒会激活自主神经系统，进而引起瞳孔变化(Mathôt, 2018)。虽然早期 Hess (1965)的研究认为情绪刺激引起瞳孔的双向变化——积极情绪引起瞳孔扩张，消极情绪引起瞳孔缩小，但后来大部分研究推翻了该结果。比如，相比于中性刺激，吓人的图片、好听或熟悉的音乐、哭声或笑声等情绪刺激都引起了瞳孔扩张(Bradley, Miccoli, Escrig, & Lang, 2008; Laeng, Eidet, Sulutvedt, & Panksepp, 2016; Snowden et al., 2016)；相比于积极情绪刺激，人们对消极情绪刺激更加敏感，更易产生瞳孔扩张，且扩张持续时间更久(Babiker, Faye, & Malik, 2013; Derksen, van Alphen, Schaap, Mathôt, & Naber, 2018; Oliva & Anikin, 2018; 袁加锦，李红，2012)。另外，触觉刺激也会诱发情绪，研究发现人类抚摸比机器抚摸引起的瞳孔扩张更大，并且抚摸速度与瞳孔扩张在一定程度上成正比关系(Ellingsen et al., 2013; van Hooijdonk et al., 2019)；在飞行模拟中，飞行员报告的焦虑水平和瞳孔大小成正相关(Tichon, Mavin, Wallis, Visser, & Riek, 2014)。以上研究结果表明开心、悲伤、焦虑等情绪刺激可以引起瞳孔扩张，与情绪效价无关，但其他更为复杂的情绪(如：蔑视、哀愁、思念等)是否也能引起瞳孔扩张仍有待探究。

动机作为重要的心理变量，它不仅影响人的内驱力也会影响瞳孔的变化。Hess 的早期研究发现饥饿状态下的被试对食物图片表现出瞳孔扩张

(Hess, 1965, 1975)。近期研究发现瞳孔扩张与性兴趣有关, 表现为异性恋男性对异性成人图片的瞳孔扩张最强, 同性恋男性对男性成人图片的瞳孔扩张最强, 双性恋男性对男性或者女性成人图片都出现瞳孔扩张, 而对异性和同性的儿童图片则没有表现出明显的瞳孔扩张(Attard-Johnson, Bindemann, & Ciardha, 2017), 说明生理动机与瞳孔扩张存在一定的关联。除了生理动机, 基于特殊人群的研究还发现社会动机也会引起瞳孔变化。如抑郁症患者(major depressive disorder, MDD)的主要症状为心境低落、思维迟缓、意志活动减退, 他们在问题解决任务中的焦虑会抑制其瞳孔扩张; 但是, 通过提高动机水平能够促进抑郁症患者的瞳孔扩张(Jones, Siegle, & Mandell, 2015)。有研究者也认为低动机可能是精神分裂症患者在执行双步骤任务(the double-step task)时瞳孔变化迟钝的原因之一(Thakkar et al., 2018)。需要注意的是, 动机在维度和强度上可以分为多种类型, 对瞳孔变化的影响可能也存在差异, 如趋避动机是否都会引起瞳孔扩张, 在强度上是否有差异等等。

1.3　心理努力

心理努力指在任务操作过程中为达到目的而投入的认知资源, 往往伴随着瞳孔扩张(Beatty, 1982; van der Wel & van Steenbergen, 2018)。一方面, 任务难度通过影响心理努力进而影响瞳孔变化(Beatty & Kahneman, 1966; Hess & Polt, 1964)。高难度任务需要的心理努力更多, 瞳孔扩张更大, 但是当任务难度超过认知负荷时瞳孔就不再扩张。因此以往研究通过操纵任务难度导致瞳孔变化的实质可能是心理努力在影响瞳孔变化(van der Wel & van Steenbergen, 2018)。儿童的研究也发现, 在短时记忆任务中瞳孔直径随着数字广度的增加而增加, 但是儿童在记忆广度达到最大值(6)时瞳孔直径达到峰值, 说明已达到儿童的认知上限, 随后的瞳孔直径减小说明儿童的心理努力降低(Johnson, Miller Singley, Peckham, Johnson, & Bunge, 2014)。

另一方面, 不同任务类型引起的心理努力不同, 瞳孔扩张的程度也有所不同。比如, 在 Stroop 任务、Flanker 任务和 Simon 任务等冲突任务范式中, 相比于一致条件, 在不一致条件下引起的瞳孔扩张更大(Diede & Bugg, 2017; Hershman & Henik, 2018; van Steenbergen & Band, 2013; Wendt, Kiesel, Geringswald, Purmann, & Fischer, 2014)。在目标导向的视觉搜索任务中, 目标越不明显, 需要的认知努力越多, 瞳孔扩张就越大(Kleberg, Del Bianco, & Falck-Ytter, 2019; Mathôt, Siebold, Donk, & Vitu, 2015); 该现象在自闭症患者中更加明显(Blaser, Eglington, Carter, & Kaldy, 2014)。决策任务的研究发现, 被试在主动按键转换任务之前就出现了瞳孔扩张, 可能在决策准备阶段就存在心理努力(Katidioti, Borst, & Taatgen, 2014), 并且决策任务的不确定性越高(Urai, Braun, & Donner, 2017)、做决策时越谨慎(Cavanagh, Wiecki, Kochar, & Frank, 2014), 瞳孔扩张越大。在学习任务中, 学习者会对主观评定为更重要的信息投入更多的心理努力, 其瞳孔扩张更大, 记忆效果也更好(Ariel & Castel, 2014)。总的来说, 在执行任务时投入的心理努力越大, 瞳孔扩张越大。但上述研究主要通过主观报告心理努力, 未来研究可以结合心理努力的其他生理指标(如: 心率、面部肌电图等), 这将有助于更好地理解心理努力与瞳孔变化的关系(van der Wel & van Steenbergen, 2018)。

1.4　社会认知与发展

个体在复杂的社会互动过程中形成的社会认知也会影响瞳孔变化, 比如: 玩 15 分钟的暴力游戏会损害被试对暴力受害者等消极图片的感知, 导致其瞳孔扩张比玩非暴力游戏组被试的瞳孔扩张更小(Arriaga et al., 2015)。此外, 研究发现婴幼儿不同的社会认知发展水平也会影响瞳孔变化。如: 在观看表情−行为一致(微笑着轻拍玩偶)或不一致(微笑着击打玩偶)的视频时, 14 个月的婴儿和 10 个月的婴儿在注视时间上没有差异, 但在瞳孔指标上有差异, 表现为 14 个月的婴儿观看表情−行为不一致视频时的瞳孔扩张更大, 而 10 个月婴儿对两类视频则没有表现出瞳孔差异, 说明 14 个月婴儿能够理解情绪与行为的关系(Hepach & Westermann, 2013)。12 个月的婴儿能够根据指示性手势对物体产生预期, 当不符合预期(即什么都没有看到)时会表现出明显的瞳孔扩张, 而 8 个月婴儿则不能理解指示性手势, 表现为有手势和无手势条件下的瞳孔大小差异不显著(Pätzold & Liszkowski, 2019)。另外, 在社会利他发展方面, 当 2~3 岁儿童看到他人需要帮助时, 尤其是由于自己的原因导致他人需要帮助时瞳孔扩张更大, 而在看到他人得到帮助后瞳孔会相对变小(Hepach,

Vaish, Müller, & Tomasello, 2017; Hepach, Vaish, & Tomasello, 2012, 2016)。

总体上，瞳孔变化受到自下而上加工和自上而下加工的共同作用。亮度变化能使瞳孔快速而明显地收缩或扩张，属于自下而上加工；同时知觉与注意、情绪与动机、心理努力、社会认知与发展等心理因素也能影响瞳孔变化，属于自上而下加工。研究者通过巧妙的实验设计控制无关变量以探究不同心理因素对瞳孔变化的影响，揭示了瞳孔变化的一些心理含义。

2 瞳孔是否影响他人的心理与行为？

回想我们看过的卡通形象，狠毒的皇后常刻画为带有很小的瞳孔和眼睛，而善良的公主往往具有大瞳孔和大眼睛，这样的设置是否具有科学依据呢？如前文所述，瞳孔变化受到多种心理因素的影响。换言之，瞳孔变化在一定程度上能够反映人的心理状态，那么瞳孔能否作为一种社会线索影响他人的心理感知甚至外在行为呢？

已有研究证实面孔会影响他人的信任、吸引力等社会感知和评价(Oosterhof & Todorov, 2008)，而进一步研究发现，虽然瞳孔只占面孔的极小部分，细微的瞳孔变化也较难被人觉察，但同样会影响他人的心理感知(Hess, 1975; Kret, 2018; Kret & de Dreu, 2019)。在主观评定上，Hess 早期的研究发现男性更多使用“温柔”、“更女性化”、“漂亮”来描述大瞳孔的女性图片；而更多使用“自私”、“冷酷”来描述小瞳孔的女性图片；即使面孔的其他方面相同，男性仍然认为瞳孔大的女性有更高的性吸引力(Hess, 1975)。实际生活中，17 世纪的意大利妇女也会通过使用颠茄草粉(Belladonna, 含有阿托品，可以阻断副交感神经对瞳孔肌肉的影响，从而放大瞳孔)扩张瞳孔来增加自己的吸引力。在一项大型的实证研究中，579 名 4~80 岁的被试给不同情绪的面孔简笔画画上瞳孔，虽然 4~9 岁孩子在高兴和生气面孔上画的瞳孔大小差异不显著，但随着年龄的增加，被试在高兴面孔上画的瞳孔更大，在生气面孔上画的瞳孔更小(Kret, 2018)。这种无意识的行为说明人们在社会化的过程中逐渐形成“大瞳孔−积极，小瞳孔−消极”的联系。在客观测量上，Harrison, Singer, Rotshtein, Dolan 和 Critchley (2006)让被试对不同情绪、不同瞳孔大小的面孔进行情绪强度评分，并记录脑成像数据。结果发现小瞳孔会增强被试对悲伤情绪强度的感知，同时带有小瞳孔的悲伤情绪面孔也显著激活了涉及社会认知的相关脑区，如左侧杏仁核(left amygdala)、左额叶(left frontal operculum)、右前扣带回(right dorsal anterior cingulate)等，从认知神经角度证明了瞳孔大小能影响他人的情绪感知。

不仅如此，瞳孔还会影响他人的外在行为。瞳孔模仿(pupil mimicry)，也称瞳孔传染(pupillary contagion)，指个体瞳孔的大小会随着观察到的他人瞳孔变化而变化的现象(Mathôt & Naber, 2018; Galazka et al., 2018)。 Hess 在 1975 年最早发现瞳孔模仿现象，后期研究也发现在成人(Kret & de Dreu, 2017; Kret, Tomonaga, & Matsuzawa, 2014)，婴儿(Fawcett, Arslan, Falck-Ytter, Roeyers, & Gredebäck, 2017; Fawcett, Wesevich, & Gredebäck, 2016)，甚至猩猩(Kret et al., 2014)中都存在瞳孔模仿。当交流的双方达到心理耦合(mental coupling)时，瞳孔模仿最强(Kang & Wheatley, 2017)，瞳孔模仿有助于人们了解对方的心理情绪状态，在人际交流过程中发挥重要的社会功能。最新研究发现在观看面孔时，虽然自闭症被试对眼睛的注视时间显著少于正常被试，但自闭症被试和正常被试都出现了瞳孔模仿现象(Galazka et al., 2018)。因此该研究认为自闭症患者也能感知他人传递的情感并产生唤醒，对传统认为自闭症患者对社会情感信息淡漠的观点提出了挑战。值得注意的是，尽管上述研究将瞳孔模仿作为一种社会交流的表现，但瞳孔模仿是否属于一种具有社会意义的模仿仍有待进一步确定(Derksen et al., 2018; Mathôt & Naber, 2018, 详见 5.2 展望)。此外，瞳孔大小及变化也能影响他人的信任行为和不诚信行为。Kret, Fischer 和 de Dreu (2015)操纵信任投资游戏中同伴的瞳孔大小，发现被试更愿意信任瞳孔更大的同伴并做出更多的投资(Kret & de Dreu, 2017; Prochazkova et al., 2018)；当同伴的瞳孔扩张时，被试的不诚信行为显著降低(van Breen, de Dreu, & Kret, 2018)。有趣的是，抑郁症患者却更加信任瞳孔变化小的同伴，与瞳孔大小无关，一种解释是瞳孔变化反映一个人的情绪变化，而抑郁症患者更偏好情绪稳定的同伴，另一种解释是瞳孔扩张被认为是一种情绪线索或表情(Bradley et al., 2008)，由于抑郁症患者的表情识别能力受损，因此无法像健康人一样更信任大瞳孔的同伴

(Wehebrink, Koelkebeck, Piest, de Dreu, & Kret, 2018)。与健康人相似的是，抑郁患者对瞳孔扩张的模仿同样促进了更多的信任行为(Wehebrink et al., 2018)。

为什么拥有大瞳孔的人会赢得他人更多的信任，甚至能减少他人的不诚信行为？Prochazkova 等人(2018)发现同伴瞳孔扩张以及被试的瞳孔模仿能激活被试的心理理论相关的脑区，如楔前叶(precuneus)、颞顶联合区(temporo-parietal junction)、颞上沟(superior temporal sulcus)、内侧前额叶皮层(medial prefrontal cortex)等，进而影响行为。从实际意义来看，相比于面部表情、手势等非言语交流信息，瞳孔较难受到意识的控制，能更加真实地反映内部心理状态，因此可以作为交流过程中信任与合作的重要且可靠的信息来源(Kret et al., 2015; Kret & de Dreu, 2019)。虽然瞳孔是一个常被忽视的生理和社会线索，但上述研究证明瞳孔能影响他人的心理感知，甚至影响重要的社会行为(主要表现为大瞳孔引起他人更多的积极评价和行为)，说明瞳孔在社会交流中的作用不可忽视。

3　瞳孔变化的神经机制及自适应增益理论

3.1　瞳孔的神经机制

从生理结构上来讲，瞳孔是虹膜中央的透明圆孔，对亮度非常敏感。光线通过瞳孔投射到视网膜上，刺激虹膜中控制瞳孔大小的平滑肌：圆环状的括约肌(constrictor pupillae)和放射状的扩张肌(dilator pupillae)，两者共同调节到达视网膜的光线量，以产生最佳视觉。瞳孔收缩主要受到光刺激的影响，其神经通道比较简单，即光线投射到视网膜后产生神经冲动，经过 E-W 核(Edinger-Westphal nucleus)传递信息使得括约肌收缩，瞳孔直径减小。瞳孔扩张的神经通道主要包括：(1)光线减少导致瞳孔反射性扩张；(2)大脑认知活动激活蓝斑−去甲肾上腺素系统(locus coeruleus-norepinephrine, LC-NE)作用于扩张肌使瞳孔扩张；(3)蓝斑核(locus coeruleus, LC)的激活会抑制 E-W 核传递信息，进而抑制瞳孔收缩(Mathôt, 2018)(见图 1)。

其中，LC-NE 系统是影响瞳孔变化的主要神经生理机制(Costa & Rudebeck, 2016; Elman et al., 2017; Joshi, Li, Kalwani, & Gold, 2016; Liu, Rodenkirch, Moskowitz, Schriver, & Wang, 2017)。LC 存在紧张(tonic)和相位(phasic)两种活动阶段，通过释放 NE 作用于中枢神经系统(Aston-Jones & Waterhouse, 2016)。LC 在紧张活动阶段处于持续而弥散的状态，个体容易探测到新刺激，在目标搜索时的瞳孔直径变化与 LC 紧张活动的放电频率相一致(Joshi et al., 2016; Murphy, O'Connell,

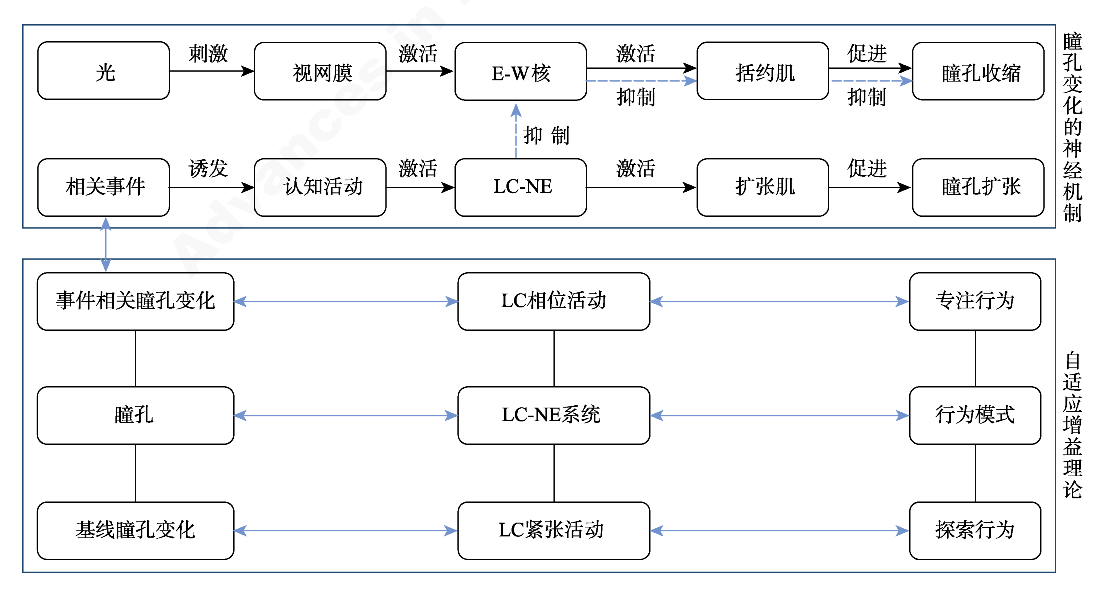


图 1　瞳孔变化的神经机制及自适应增益理论

注：参考 Aston-Jones & Cohen, 2005; Gilzenrat et al., 2010; Mathôt, 2018; Wang & Munoz, 2015 制作

O'Sullivan, Robertson, & Balsters, 2014; Murphy, Robertson, Balsters, & O'Connell R, 2011); LC 在相位活动阶段处于快速而短暂变化的状态，个体表现出高水平的相关任务加工，瞳孔出现快速而明显的变化(Beatty, 1982)。总的来说，LC 的紧张活动阶段对应瞳孔的基线状态，而相关事件通过引起 LC 的相位活动进而影响瞳孔变化。此外，瞳孔变化还与海马体活动(McGinley, David, & McCormick, 2015)、视觉皮质激活(Reimer et al., 2014)和肾上腺素能和胆碱能活性(Reimer et al., 2016)等多种控制心理活动的神经机制有关。正如 Lawrence Stark 所述：“瞳孔是神经控制系统的范例，瞳孔测量则是生理学中的数学方法” (引自：Loewenfeld, 1993)。瞳孔变化作为 LC-NE 系统活动及其他大脑内皮层状态的指标之一，间接又直观地反映了大脑控制下的心理活动(Murphy et al., 2014; Reimer et al., 2014)。

3.2 自适应增益理论与瞳孔

Aston-Jones 和 Cohen (2005)提出自适应增益理论(the adaptive-gain theory)来解释瞳孔与行为的关系，以及 LC-NE 在其中的调节作用(参见图 1)。该理论认为人的行为存在两种模式：专注(exploitation)和探索(exploration)，个体在两种模式间转换以获得最大的收益。LC-NE 系统在两种模式间发挥着重要作用，专注行为常常伴随着 LC 的相位活动，不同的任务难度、任务反馈等事件会激活不同的 LC 相位活动，从而影响瞳孔变化(Gilzenrat, Nieuwenhuis, Jepma, & Cohen, 2010)。而当不能从相关任务中获益时，个体就会从当前任务中脱离以搜索新目标，该行为常常伴随着 LC 的紧张活动，从而影响瞳孔的基线水平(Gilzenrat et al., 2010; Jepma & Nieuwenhuis, 2011; Reimer et al., 2014)。因此研究者常将瞳孔测量作为检验自适应增益理论的方法(Thakkar et al., 2018)，而该理论也为瞳孔反映认知加工、情绪唤醒等心理活动提供了理论框架与支持(Mathôt, 2018)。

4 如何有效地测量瞳孔

探索瞳孔与心理之间的关系离不开瞳孔测量技术的发展。Hess (1965)用简单的瞳孔反应装置记录被试的瞳孔，开始了基于瞳孔测量的心理学研究。但该设备的采样率低、记录不准确等问题也显而易见(Janisse, 1973)。随着眼动追踪技术的发展，眼动仪能同时记录眼动时的瞳孔变化，也发展出专门用于测量瞳孔变化的瞳孔测量仪(pupillometer)。瞳孔测量逐渐被独立应用于心理学研究并揭示了很多心理活动(如：知觉、注意、心理努力等)，具有独特的优势，被认为是一种易操作的、可靠的、无创的、可视化的方法(Bradley, Sapigao, & Lang, 2017)。相比于常用的行为测量(如：反应时、正确率)和皮电、心率等神经活动指标，瞳孔指标能灵敏和动态地反映人的心理变化；相比于事件相关电位、脑成像等神经生理技术，瞳孔测量技术的费用相对低廉，操作简单，对被试干扰小。但是瞳孔测量也存在一个特别的挑战，即灵敏的瞳孔指标极易受到无关变量的干扰(如：亮度、注视位置、眨眼等)，因此如何有效而准确地测量瞳孔是很多研究者的困扰之一。总结前人的研究经验，在应用瞳孔测量的研究中要特别注意以下几个方面：

第一，亮度控制。亮度是影响瞳孔变化的主要物理因素(Mathôt, 2018)，因此记录瞳孔数据时必须严格控制亮度，尤其在生态环境中应谨慎使用瞳孔指标(Peysakhovich, Vachon, & Dehais, 2017)。为了更好地控制该因素，研究者建议在中等亮度环境中进行认知任务研究(Eckstein, Guerra-Carrillo, Singley, & Bunge, 2017; Steinhauer, Siegle, Condray, & Pless, 2004)。相比于周围环境亮度，瞳孔受屏幕亮度的影响更大(屏幕亮度引起瞳孔的变化阈限值为 1 mm；周围亮度引起瞳孔的变化阈限值为 0.4 mm) (Benedetto, Carbone, Drai-Zerbib, Pedrotti, & Baccino, 2014)，因此在控制周围亮度后，应该对刺激的亮度进行平均化处理，以减少亮度对瞳孔变化的干扰。

第二，注视位置。眼动追踪研究使用较多的是基于光学记录的眼动仪器(如：瞳孔-角膜反射记录)，当摄像机固定而眼睛注视不同位置时，虽然瞳孔实际大小可能没有变化，但是记录到的瞳孔面积会因眼球旋转而发生变化。更有研究发现，注视位置对瞳孔的影响也因眼动仪而异。Brisson 等人(2013)让被试追踪顺时针转动的蓝点，考察注视位置与眼动仪器对瞳孔大小的影响，发现 Tobii 系统下，瞳孔直径更易受水平位置影响(左边注视位置的瞳孔大小被高估)；而 Eyelink 系统下，更容易受垂直位置影响(下方注视位置的瞳孔大小被高估)。因此，在实际操作中最好将实验材

料放到屏幕中间。

第三, 瞳孔基线校正。考虑到瞳孔震颤、瞳孔大小的个体差异等对结果的影响, 研究者必须进行基于瞳孔基线的校正或对比, 以提高统计检验力。基线的选取既可以是刺激呈现前的 0.5 s 或 1 s (例如: Binda & Murray, 2015; Olmos-Solis, van Loon, & Olivers, 2018; Peysakhovich, Causse, Scannella, & Dehais, 2015;Chen & Westermann, 2018; Laeng & Sulutvedt, 2014), 也可以是刺激呈现后 0.5 s (例如: Galazka et al., 2018)的瞳孔直径。这主要根据实验任务和目的来确定, 目前没有统一的标准。确定基线后, 研究者需要把实验条件下的瞳孔大小根据基线进行处理, 处理方法主要有 2 种: 除法换算(瞳孔校正值 = 瞳孔大小/基线值)和减法换算(瞳孔校正值 = 瞳孔大小 − 基线值)。Mathôt 等人(2018)通过模拟数据和实验数据来比较两种处理方法的优缺点, 发现减法换算受到眨眼等噪音的影响更小, 是一个较为理想的瞳孔校正方法。同时, Mathôt 等人(2018)也为研究者如何更有效地进行瞳孔校正提出了 5 点建议: (1)对数据进行预处理(如: 处理缺失值、异常值; 校正因注视位置不同而产生的瞳孔直径误差); (2)采用减法换算对瞳孔进行校正; (3)直接观察、对比校正后的数据和原始数据的差异, 确保校正后的数据没有出现本质改变; (4)如果校正后的瞳孔大小在 220 ms (瞳孔变化潜伏期)内明显变大, 说明可能存在基线异常值; (5)通过基线瞳孔值画柱状图, 删除异常小的瞳孔基线值。经过基线校正后的瞳孔值能更加客观地反映实验条件操纵引起的变化, 为瞳孔测量在科学领域的应用提供了支持。

第四, 眨眼的处理。在实验过程中被试眨眼可能会导致数据缺失, 一种处理方法是在每次眨眼之前和之后(眨眼前后的 100 或 150 ms)对瞳孔测量值进行内插法(interpolation)处理(例如: Kloosterman et al., 2015; Knapen, Gee, Hoppenbrouwers, & Theeuwes, 2016; Olmos-Solis et al., 2018)。但眨眼后进入视网膜的亮度比眨眼时更强, 瞳孔会出现轻微而快速的缩小, 甚至需要 5 s 才会恢复到基线水平(Knapen et al., 2016)。Knapen 等人(2016)设计了 FIR 去卷积算法(finite impulse-response deconvolution)对眨眼产生的瞳孔变化进行一般线性模型(GLM)估计, 有助于减少因眨眼产生的瞳孔测量误差。前一种方法的计算较为简单, 使用更加广泛; 但是第二种处理方法考虑了因光线突然增强引起瞳孔收缩的影响, 更为严谨。

其他方面, 如左右眼瞳孔的选择, 由于左右眼的瞳孔差异不大(Brisson et al., 2013), 大部分研究在数据采集时选取任意一只眼的数据, 也可以对左右眼的瞳孔大小进行平均。瞳孔指标的选择, 使用最多的是基线校正过(一般是减去基线平均值)的平均瞳孔直径或峰值(van Hooijdonk et al., 2019; Wendt, Koelewijn, Ksiazek, Kramer, & Lunner, 2018), 也可以在此基础上进行 Z 分数标准化处理(Derksen et al., 2018), 研究者可以参考所在领域常用的瞳孔指标来选择。

5　总结与展望

5.1　总结

综上所述, 瞳孔不仅受到物理亮度的自下而上的影响, 还受到知觉与注意、心理努力、情绪动机和社会认知与发展等自上而下加工的影响, 瞳孔指标在控制好无关变量的前提下可以作为探测心理活动的重要指标之一。在社会交流过程中, 瞳孔会影响他人的心理感知与外显行为。研究证实较大的瞳孔能引起他人的积极评价和行为。瞳孔与心理的紧密联系缘于瞳孔的神经机制, 主要是蓝斑−去甲肾上腺素系统的作用。另外, 自适应增益理论揭示了瞳孔−生理机制−行为模式三者之间的对应关系。最后, 本文从如何排除或控制无关变量和如何处理瞳孔数据两方面对现有文献进行整理, 并提出操作性建议。

5.2　展望

未来研究可以在以下方面继续展开相关研究:

第一, 瞳孔在心理学研究中的应用面临的最大挑战是如何解释瞳孔变化背后的心理含义(Hepach & Westermann, 2016)。例如, 大部分研究认为瞳孔模仿是一种情感交流的社会现象(Prochazkova & Kret, 2017; Prochazkova et al., 2018); 但也有研究者提出瞳孔模仿只是简单的光反射, 没有社会信息。因为瞳孔比虹膜暗, 瞳孔扩张会降低眼睛区域的亮度, 从而使他人反射性的瞳孔扩张, 因此, 瞳孔模仿能否作为社会交流的指标仍有待商榷(Derksen et al., 2018; Mathôt & Naber, 2018)。更重要的是, 瞳孔扩张并不能直接告诉我们唤醒的是哪一部分心理过程, 因此在实验设计时应尽量避

免无关因素的干扰，尤其是实验过程中自发产生的额外情绪、认知负荷、朝向反应、疲劳等因素，在解释结果时也应该谨慎。在撰写研究报告时也必须详细报告数据收集(如：亮度、注视位置、仪器)和数据处理(如：基线、眨眼、无效瞳孔数据)的方法，保证研究的严谨性。

第二，探究瞳孔大小及变化如何影响他人的心理感知与行为。Hess (1965, 1975)较早开始研究瞳孔如何影响他人的主观评价，但后续研究进展缓慢。近年以 Kret 为代表的心理学家发现大瞳孔能促进他人的信任行为，并展开了一些研究(Kret et al., 2015; Kret & de Dreu, 2019)。他们主要探究在社会互动中瞳孔大小对被试信任投资的影响是否受到同伴特点(如：同伴的瞳孔动静状态、眼睛注视方向，同伴是否与被试来自同一群体等)和任务情境(如：被试与同伴是否有利益冲突)的影响(Kret & De Dreu, 2017; Kret & de Dreu, 2019; van Breen at al., 2018)。但人的心理与行为远不止于此，探究瞳孔如何影响他人的其他心理过程(如：注意、情绪与动机等)和社会行为(如：助人行为、攻击行为、从众行为等)也将是未来研究者共同努力的方向。此外，文化因素也可能是一个影响因素，未来研究可以比较中西方文化背景下瞳孔大小对他人心理与行为的影响。

第三，未来研究可以继续探索增加瞳孔指标解释力的途径。在测量和数据分析等技术层面，已有研究者设计了 Pupil©平台，提供价格低、操作方便的硬件和软件设备(具体参见：Picanco & Tonneau, 2018)，也有由 MATLAB 编写的开源软件 CHAP (Cohen and Hershman Analysis Pupil)来独立分析瞳孔数据，包括 EyeLink, Tobii 等眼动仪记录的数据(Hershman, Henik, & Cohen, 2019)。在理论层面，研究者应该把瞳孔测量提高到理论层次去解释瞳孔变化，如自适应增益理论将神经生理活动、外显行为模式和瞳孔变化结合来探讨三者的关系，但该理论没有区分具体的心理活动。另外，国内研究常把瞳孔大小作为辅助指标之一来反映认知负荷(陈庆荣，邓铸，谭顶良，2008)、兴趣(王福兴，侯秀娟，段朝辉，刘华山，李卉，2016)和疲劳(李勇，阴国恩，陈燕丽，2004)等心理因素，未来研究可以将瞳孔测量结合其他技术(尤其是电生理技术)来拓宽其使用，有助于理解瞳孔与心理−神经生理之间的关系。

第四，使用不同的瞳孔指标进行数据分析。大部分研究以测量瞳孔大小及其变化值作为指标(闫国利 等, 2013)，但由于瞳孔大小会受到光线、距离、仪器等客观因素影响而产生误差，有研究模仿 MEG/EEG 研究中的稳态视觉诱发电位(steady-state visual evoked potentials)方法，对瞳孔震颤频率进行分析，用快速傅里叶转换法(Fast Fourier Transform, FFT)处理数据，发现在目标搜索任务中，被注意到的刺激的闪烁频率与瞳孔震颤频率同步，即被注意到的刺激的闪烁频率越高，瞳孔震颤越强(Naber, Alvarez, & Nakayama, 2013)。该研究表明瞳孔震颤与瞳孔大小一样都能反映注意，为瞳孔测量和注意的研究提供了新方法。未来研究也可以把瞳孔震颤作为其他心理活动的指标，也将有助于研究者更全面地理解瞳孔与心理的关系。

第五，拓宽瞳孔测量在科学研究和实际生活中的应用，尤其是特殊人群的实验和临床研究。研究发现瞳孔大小能反映精神分裂症患者在做决策时的心理努力(Reddy, Reavis, Wynn, & Green, 2018)，Choi 等人(2017)设计了基于瞳孔的神经反馈认知训练，根据瞳孔反映出来的心理努力及时调节任务难度，有助于提高精神分裂症患者的加工速度和社会功能。另外，近年来有研究通过执行任务时的瞳孔变化反映心理功能障碍，将瞳孔的异常变化作为抑郁症、精神分裂症和自闭症的诊断和风险预测指标之一(Burley, Gray, & Snowden, 2018; Kudinova et al., 2016; Nystrom et al., 2018)。但需要注意的是，大部分研究以接受药物治疗的患者为研究对象，由于药物也会对瞳孔产生影响，未来研究可以选择未接受药物治疗的患者为研究对象，借助瞳孔测量来探究疾病对患者心理功能的影响(Thakkar et al., 2018)。瞳孔测量也为了解前语言阶段婴幼儿的社会认知、言语发展提供了一个重要的窗口(Hepach & Westermann, 2016; 王福兴，童钰，钱莹莹，谢和平，2016)。总的来说，瞳孔测量作为一种具有高时间分辨率和良好神经基础的非侵入性、补充性认知测量方法，有望应用于临床、发展、神经的研究(Bradley et al., 2017; Eckstein et al., 2017)。

参考文献

陈庆荣，邓铸，谭顶良. (2008). 汉语句子-图片信息整合的眼动测量. *心理学报, 40*(5), 543–551.

李勇, 阴国恩, 陈燕丽. (2004). 阅读中疲劳、心理负荷因素对瞳孔大小的调节作用. *心理与行为研究, 2*(3), 545–548.

王福兴, 侯秀娟, 段朝辉, 刘华山, 李卉. (2016). 中国象棋经验棋手与新手的知觉差异: 来自眼动的证据. *心理学报, 48*(5), 457–471.

王福兴, 童钰, 钱莹莹, 谢和平. (2016). 眼动追踪技术与婴幼儿研究: 程序、方法与数据分析. *心理与行为研究, 14*(4), 558–567.

闫国利, 熊建萍, 臧传丽, 余莉莉, 崔磊, 白学军. (2013). 阅读研究中的主要眼动指标评述. *心理科学进展, 21*(4), 589–605.

袁加锦, 李红. (2012). 人类对情绪事件效价强度的易感性及神经机制. *心理科学进展, 20*(1), 10–19.

Ariel, R., & Castel, A. (2014). Eyes wide open: Enhanced pupil dilation when selectively studying important information. *Experimental Brain Research, 232*(1), 337–344.

Arriaga, P., Adrião, J., Madeira, F., Cavaleiro, I., Maia e Silva, A., Barahona, I., & Esteves, F. (2015). A "dry eye" for victims of violence: Effects of playing a violent video game on pupillary dilation to victims and on aggressive behavior. *Psychology of Violence, 5*(2), 199–208.

Aston-Jones, G., & Cohen, J. D. (2005). An integrative theory of locus coeruleus-norepinephrine function: Adaptive gain and optimal performance. *Annual Review of Neuroscience, 28*, 403–450.

Aston-Jones, G., & Waterhouse, B. (2016). Locus coeruleus: From global projection system to adaptive regulation of behavior. *Brain Research, 1645*, 75–78.

Attard-Johnson, J., Bindemann, M., & Ciardha, C. Ó. (2017). Heterosexual, homosexual, and bisexual men's pupillary responses to persons at different stages of sexual development. *The Journal of Sex Research, 54*(9), 1085–1096.

Babiker, A., Faye, I., & Malik, A. (2013, January). *Pupillary behavior in positive and negative emotions*. Paper presented at the meeting of IEEE International Conference on Signal and Image Processing Applications, Melaka, Malaysia.

Beatty, J. (1982). Task-evoked pupillary responses, processing load, and the structure of processing resources. *Psychological Bulletin, 91*(2), 276–292.

Beatty, J., & Kahneman, D. (1966). Pupillary changes in two memory tasks. *Psychonomic Science, 5*(10), 371–372.

Beatty, J., & Lucero-Wagoner, B. (2000). The pupillary system. In J. T. Cacioppo, L. G. Tassinary & G. G. Berntson (Eds.), *Handbook of psychophysiology* (2nd ed., pp. 142–162). New York: Cambridge University Press.

Benedetto, S., Carbone, A., Drai-Zerbib, V., Pedrotti, M., & Baccino, T. (2014). Effects of luminance and illuminance on visual fatigue and arousal during digital reading. *Computers in Human Behavior, 41*, 112–119.

Binda, P., & Murray, S. O. (2015). Spatial attention increases the pupillary response to light changes. *Journal of Vision, 15*(2), 1–13.

Binda, P., Pereverzeva, M., & Murray, S. O. (2013). Attention to bright surfaces enhances the pupillary light reflex. *The Journal of Neuroscience, 33*(5), 2199–2204.

Blaser, E., Eglington, L., Carter, A. S., & Kaldy, Z. (2014). Pupillometry reveals a mechanism for the Autism Spectrum Disorder (ASD) advantage in visual tasks. *Scientific Reports, 4*, 4301.

Bradley, M. M., Miccoli, L., Escrig, M. A., & Lang, P. J. (2008). The pupil as a measure of emotional arousal and autonomic activation. *Psychophysiology, 45*(4), 602–607.

Bradley, M. M., Sapigao, R. G., & Lang, P. J. (2017). Sympathetic ANS modulation of pupil diameter in emotional scene perception: Effects of hedonic content, brightness, and contrast. *Psychophysiology, 54*(10), 1419–1435.

Brisson, J., Mainville, M., Mailloux, D., Beaulieu, C., Serres, J., & Sirois, S. (2013). Pupil diameter measurement errors as a function of gaze direction in corneal reflection eyetrackers. *Behavior Research Methods, 45*(4), 1322–1331.

Burley, D. T., Gray, N. S., & Snowden, R. J. (2018). Emotional modulation of the pupil response in psychopathy. *Personality Disorders: Theory, Research, and Treatment, 10*(4), 365–375.

Cavanagh, J. F., Wiecki, T. V., Kochar, A., & Frank, M. J. (2014). Eye tracking and pupillometry are indicators of dissociable latent decision processes. *Journal of Experimental Psychology: General, 143*(4), 1476–1488.

Chen, Y. C., & Westermann, G. (2018). Different novelties revealed by infants' pupillary responses. *Scientific Reports, 8*, 9533.

Choi, J., Corcoran, C. M., Fiszdon, J. M., Stevens, M., Javitt, D. C., Deasy, M., ... Pearlson, G. D. (2017). Pupillometer-based neurofeedback cognitive training to improve processing speed and social functioning in individuals at clinical high risk for psychosis. *Psychiatric Rehabilitation Journal, 40*(1), 33–42.

Costa, V. D., & Rudebeck, P. H. (2016). More than meets the eye: The relationship between pupil size and locus coeruleus activity. *Neuron, 89*(1), 8–10.

Derksen, M., van Alphen, J., Schaap, S., Mathôt, S., & Naber, M. (2018). Pupil mimicry is the result of brightness perception of the iris and pupil. *Journal of Cognition, 1*(1), 32.

Diede, N. T., & Bugg, J. M. (2017). Cognitive effort is modulated outside of the explicit awareness of conflict frequency: Evidence from pupillometry. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition,*

43(5), 824–835.

Eckstein, M. K., Guerra-Carrillo, B., Singley, A. T. M., & Bunge, S. A. (2017). Beyond eye gaze: What else can eyetracking reveal about cognition and cognitive development? *Developmental Cognitive Neuroscience, 25*, 69–91.

Ellingsen, D. M., Wessberg, J., Chelnokova, O., Olausson, H., Laeng, B., & Leknes, S. (2013). In touch with your emotions: Oxytocin and touch change social impressions while others' facial expressions can alter touch. *Psychoneuroendocrinology, 39*, 11–20.

Elman, J. A., Panizzon, M. S., Hagler, D. J., Jr., Eyler, L. T., Granholm, E. L., Fennema-Notestine, C., ... Kremen, W. S. (2017). Task-evoked pupil dilation and BOLD variance as indicators of locus coeruleus dysfunction. *Cortex, 97*, 60–69.

Fawcett, C., Arslan, M., Falck-Ytter, T., Roeyers, H., & Gredebäck, G. (2017). Human eyes with dilated pupils induce pupillary contagion in infants. *Scientific Reports, 7*, 9601.

Fawcett, C., Wesevich, V., & Gredebäck, G. (2016). Pupillary contagion in infancy: Evidence for spontaneous transfer of arousal. *Psychological Science, 27*(7), 997–1003.

Galazka, M. A., Åsberg Johnels, J., Zürcher, N. R., Hippolyte, L., Lemonnier, E., Billstedt, E., ... Hadjikhani, N. (2018). Pupillary contagion in autism. *Psychological Science, 30*(2), 309–315.

Geva, R., Zivan, M., Warsha, A., & Olchik, D. (2013). Alerting, orienting or executive attention networks: Differential patters of pupil dilations. *Frontiers in Behavioral Neuroscience, 7*, 145.

Gilzenrat, M., Nieuwenhuis, S., Jepma, M., & Cohen, J. (2010). Pupil diameter tracks changes in control state predicted by the adaptive gain theory of locus coeruleus function. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience, 10*(2), 252–269.

Goldwater, B. C. (1972). Psychological significance of pupillary movements. *Psychological Bulletin, 77*(5), 340–355.

Harrison, N. A., Singer, T., Rotshtein, P., Dolan, R. J., & Critchley, H. D. (2006). Pupillary contagion: Central mechanisms engaged in sadness processing. *Social Cognition Affective Neuroscience, 1*(1), 5–17.

Hepach, R., Vaish, A., Muller, K., & Tomasello, M. (2017). The relation between young children's physiological arousal and their motivation to help others. *Neuropsychologia, 126*, 113–119.

Hepach, R., Vaish, A., & Tomasello, M. (2012). Young children are intrinsically motivated to see others helped. *Psychological Science, 23*(9), 967–972.

Hepach, R., Vaish, A., & Tomasello, M. (2016). Children's intrinsic motivation to provide help themselves after accidentally harming others. *Child Development, 88*(4), 1251–1264.

Hepach, R., & Westermann, G. (2013). Infants' sensitivity to the congruence of others' emotions and actions. *Journal of Experimental Child Psychology, 115*(1), 16–29.

Hepach, R., & Westermann, G. (2016). Pupillometry in infancy research. *Journal of Cognition and Development, 17*(3), 359–377.

Hershman, R., & Henik, A. (2018). Dissociation between reaction time and pupil dilation in the Stroop task. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition, 45*(10), 1899–1909.

Hershman, R., Henik, A., & Cohen, N. (2019). CHAP: Open-source software for processing and analyzing pupillometry data. *Behavior Research Methods, 51*(3), 1059–1074.

Hess, E. H. (1965). Attitude and pupil size. *Scientific American, 212*(4), 46–54.

Hess, E. H. (1975). The role of pupil size in communication. *Scientific American, 233*(5), 110–119.

Hess, E. H., & Polt, J. M. (1960). Pupil size as related to interest value of visual stimuli. *Science, 132*(3423), 349–350.

Hess, E. H., & Polt, J. M. (1964). Pupil size in relation to mental activity during simple problem-solving. *Science, 143*(3611), 1190–1192.

Janisse, M. P. (1973). Pupil size and affect: A critical review of the literature since 1960. *Canadian Psychologist/ Psychologie Canadienne, 14*(4), 311–329.

Jepma, M., & Nieuwenhuis, S. (2011). Pupil diameter predicts changes in the exploration-exploitation trade-off: Evidence for the adaptive gain theory. *Journal of Cognitive Neuroscience, 23*(7), 1587–1596.

Johnson, E. L., Miller Singley, A. T., Peckham, A. D., Johnson, S. L., & Bunge, S. A. (2014). Task-evoked pupillometry provides a window into the development of short-term memory capacity. *Frontiers in Psychology, 5*, 218.

Jones, N. P., Siegle, G. J., & Mandell, D. (2015). Motivational and emotional influences on cognitive control in depression: A pupillometry study. *Cognitive Affective & Behavioral Neuroscience, 15*(2), 263–275.

Joshi, S., Li, Y., Kalwani, R. M., & Gold, J. I. (2016). Relationships between pupil diameter and neuronal activity in the locus coeruleus, colliculi, and cingulate cortex. *Neuron, 89*(1), 221–234.

Kang, O., & Wheatley, T. (2017). Pupil dilation patterns spontaneously synchronize across individuals during shared attention. *Journal of Experimental Psychology: General, 146*(4), 569–576.

Katidioti, I., Borst, J. P., & Taatgen, N. A. (2014). What happens when we switch tasks: Pupil dilation in multitasking. *Journal of Experimental Psychology: Applied, 20*(4), 380–396.

Kleberg, J. L., Del Bianco, T., & Falck-Ytter, T. (2019). How infants' arousal influences their visual search. *Child Development, 90*(4), 1413–1423.

Kloosterman, N. A., Meindertsma, T., van Loon, A. M., Lamme, V. A., Bonneh, Y. S., & Donner, T. H. (2015). Pupil size tracks perceptual content and surprise. *European Journal of Neuroscience, 41*(8), 1068–1078.

Knapen, T., Gee, J. W. d., Hoppenbrouwers, S. S., & Theeuwes, J. (2016). Cognitive and ocular factors jointly determine pupil responses under equiluminance. *PLoS ONE, 11*(5), e0155574.

Kret, M. E. (2018). The role of pupil size in communication. Is there room for learning? *Cognition and Emotion, 32*(5), 1139–1145.

Kret, M. E., & de Dreu, C. K. W. (2017). Pupil-mimicry conditions trust in partners: Moderation by oxytocin and group membership. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences, 284*(1850), 20162554.

Kret, M. E., & de Dreu, C. K. W. (2019). The power of pupil size in establishing trust and reciprocity. *Journal of Experimental Psychology: General*, *148*(8), 1299–1311.

Kret, M. E., Fischer, A. H., & de Dreu, C. K. W. (2015). Pupil mimicry correlates with trust in in-group partners with dilating pupils. *Psychological Science, 26*(9), 1401–1410.

Kret, M. E., Tomonaga, M., & Matsuzawa, T. (2014). Chimpanzees and humans mimic pupil-size of conspecifics. *PLoS ONE, 9*(8), e104886.

Kudinova, A. Y., Burkhouse, K. L., Siegle, G., Owens, M., Woody, M. L., & Gibb, B. E. (2016). Pupillary reactivity to negative stimuli prospectively predicts recurrence of major depressive disorder in women. *Psychophysiology, 53*(12), 1836–1842.

Laeng, B., Eidet, L. M., Sulutvedt, U., & Panksepp, J. (2016). Music chills: The eye pupil as a mirror to music's soul. *Conscious and Cognition, 44*, 161–178.

Laeng, B., & Endestad, T. (2012). Bright illusions reduce the eye's pupil. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 109*(6), 2162–2167.

Laeng, B., Sæther, L., Holmlund, T., Wang, C. E. A., Waterloo, K., Eisemann, M., & Halvorsen, M. (2013). Invisible emotional expressions influence social judgments and pupillary responses of both depressed and non-depressed individuals. *Frontiers in Psychology, 4,* 291.

Laeng, B., Sirois, S., & Gredebäck, G. (2012). Pupillometry: A window to the preconscious? *Perspectives on Psychological Science, 7*(1), 18–27.

Laeng, B., & Sulutvedt, U. (2014). The eye pupil adjusts to imaginary light. *Psychological Science, 25*(1), 188–197.

Liu, Y., Rodenkirch, C., Moskowitz, N., Schriver, B., & Wang, Q. (2017). Dynamic lateralization of pupil dilation evoked by locus coeruleus activation results from sympathetic, not parasympathetic, contributions. *Cell Reports, 20*(13), 3099–3112.

Loewenfeld, I. E. (1958). Mechanisms of reflex dilatation of the pupil. *Documenta Ophthalmologica, 12*(1), 185–448.

Loewenfeld, I. E. (1993). *The pupil: Anatomy, physiology, and clinical applications*. Detroit, MI: Wayne State University Press.

Mathôt, S. (2018). Pupillometry: Psychology, physiology, and function. *Journal of Cognition, 1*(1), 16.

Mathôt, S., Dalmaijer, E., Grainger, J., & Stigchel, S. V. D. (2014). The pupillary light response reflects exogenous attention and inhibition of return. *Journal of Vision, 14*(14), 1–9.

Mathôt, S., Fabius, J., van Heusden, E., & van Der Stigchel, S. (2018). Safe and sensible preprocessing and baseline correction of pupil-size data. *Behavior Research Methods, 50*(1), 94–106.

Mathôt, S., Grainger, J., & Strijkers, K. (2017). Pupillary responses to words that convey a sense of brightness or darkness. *Psychological Science, 28*(8), 1116–1124.

Mathôt, S., Linden, L. v. d., Grainger, J., & Vitu, F. (2015). The pupillary light response reflects eye-movement preparation. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 41*(1), 28–35.

Mathôt, S., & Naber, M. (2018). There is no evidence that pupil mimicry is a social phenomenon. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 115*(50), E11565.

Mathôt, S., Siebold, A., Donk, M., & Vitu, F. (2015). Large pupils predict goal-driven eye movements. *Journal of Experimental Psychology: General, 144*(3), 513–521.

Mathôt, S., & van der Stigchel, S. (2015). New light on the mind's eye: The pupillary light response as active vision. *Current Directions in Psychological Science, 24*(5), 374–378.

McGinley, M. J., David, S. V., & McCormick, D. A. (2015). Cortical membrane potential signature of optimal states for sensory signal detection. *Neuron, 87*(1), 179–192.

Murphy, P. R., O'Connell, R. G., O'Sullivan, M., Robertson, I. H., & Balsters, J. H. (2014). Pupil diameter covaries with BOLD activity in human locus coeruleus. *Human Brain Mapping, 35*(8), 4140–4154.

Murphy, P. R., Robertson, I. H., Balsters, J. H., & O'Connell R, G. (2011). Pupillometry and P3 index the locus coeruleus-noradrenergic arousal function in humans.

Psychophysiology, 48(11), 1532–1543.

Naber, M., Alvarez, G. A., & Nakayama, K. (2013). Tracking the allocation of attention using human pupillary oscillations. *Frontiers in Psychology, 4*, 919.

Naber, M., & Nakayama, K. (2013). Pupil responses to high-level image content. *Journal of Vision, 13*(6), 1–8.

Nystrom, P., Gliga, T., Nilsson Jobs, E., Gredeback, G., Charman, T., Johnson, M. H., ... Falck-Ytter, T. (2018). Enhanced pupillary light reflex in infancy is associated with autism diagnosis in toddlerhood. *Nature Communications, 9*, 1678.

Oliva, M., & Anikin, A. (2018). Pupil dilation reflects the time course of emotion recognition in human vocalizations. *Scientific Reports, 8*, 4871.

Olmos-Solis, K., van Loon, A. M., & Olivers, C. N. L. (2018). Pupil dilation reflects task relevance prior to search. *Journal of Cognition, 1*(1), 11.

Oosterhof, N. N., & Todorov, A. (2008). The functional basis of face evaluation. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 105*(32), 11087–11092.

Pätzold, W., & Liszkowski, U. (2019). Pupillometry reveals communication-induced object expectations in 12- but not 8-months-old infants. *Developmental Science*, 22(6): e12832.

Petersen, S. E., & Posner, M. I. (2012). The attention system of the human brain: 20 years after. *Annual Review of Neuroscience, 35*, 73–89.

Peysakhovich, V., Causse, M., Scannella, S., & Dehais, F. (2015). Frequency analysis of a task-evoked pupillary response: Luminance-independent measure of mental effort. *International Journal of Psychophysiology, 97*(1), 30–37.

Peysakhovich, V., Vachon, F., & Dehais, F. (2017). The impact of luminance on tonic and phasic pupillary responses to sustained cognitive load. *International Journal of Psychophysiology, 112*, 40–45.

Picanco, C. R., & Tonneau, F. (2018). A low-cost platform for eye-tracking research: Using Pupil© in behavior analysis. *Journal of the Experimental Analysis of Behavior, 110*(2), 157–170.

Prochazkova, E., & Kret, M. E. (2017). Connecting minds and sharing emotions through mimicry: A neurocognitive model of emotional contagion. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews, 80*, 99–114.

Prochazkova, E., Prochazkova, L., Giffin, M. R., Scholte, H. S., de Dreu, C. K. W., & Kret, M. E. (2018). Pupil mimicry promotes trust through the theory-of-mind network. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 115*(31), E7265–E7274.

Reddy, L. F., Reavis, E. A., Wynn, J. K., & Green, M. F. (2018). Pupillary responses to a cognitive effort task in schizophrenia. *Schizophrenia Research, 199*, 53–57.

Reimer, J., Froudarakis, E., Cadwell, C. R., Yatsenko, D., Denfield, G. H., & Tolias, A. S. (2014). Pupil fluctuations track fast switching of cortical states during quiet wakefulness. *Neuron, 84*(2), 355–362.

Reimer, J., McGinley, M. J., Liu, Y., Rodenkirch, C., Wang, Q., McCormick, D. A., & Tolias, A. S. (2016). Pupil fluctuations track rapid changes in adrenergic and cholinergic activity in cortex. *Nature Communications, 7*(1), 13289.

Snowden, R. J., O'Farrell, K. R., Burley, D., Erichsen, J. T., Newton, N. V., & Gray, N. S. (2016). The pupil's response to affective pictures: Role of image duration, habituation, and viewing mode. *Psychophysiology, 53*(8), 1217–1223.

Steinhauer, S. R., Siegle, G. J., Condray, R., & Pless, M. (2004). Sympathetic and parasympathetic innervation of pupillary dilation during sustained processing. *International Journal of Psychophysiology, 52*(1), 77–86.

Sylvain, S., & Julie, B. (2014). Pupillometry. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Cognitive Science, 5*(6), 679–692.

Thakkar, K. N., Brascamp, J. W., Ghermezi, L., Fifer, K., Schall, J. D., & Park, S. (2018). Reduced pupil dilation during action preparation in schizophrenia. *International Journal of Psychophysiology, 128*, 111–118.

Tichon, J. G., Mavin, T., Wallis, G., Visser, T. A. W., & Riek, S. (2014). Using pupillometry and electromyography to track positive and negative affect during flight simulation. *Aviation Psychology and Applied Human Factors, 4*(1), 23–32.

Urai, A. E., Braun, A., & Donner, T. H. (2017). Pupil-linked arousal is driven by decision uncertainty and alters serial choice bias. *Nature Communications, 8*, 14637.

van Breen, J. A., de Dreu, C. K. W., & Kret, M. E. (2018). Pupil to pupil: The effect of a partner's pupil size on (dis)honest behavior. *Journal of Experimental Social Psychology, 74*, 231–245.

van der Wel, P., & van Steenbergen, H. (2018). Pupil dilation as an index of effort in cognitive control tasks: A review. *Psychonomic Bulletin & Review, 25*(6), 2005–2015.

van Hooijdonk, R., Mathôt, S., Schat, E., Spencer, H., van der Stigchel, S., & Dijkerman, H. C. (2019). Touch-induced pupil size reflects stimulus intensity, not subjective pleasantness. *Experimental Brain Research, 237*(1), 201–210.

van Steenbergen, H., & Band, G. P. (2013). Pupil dilation in the Simon task as a marker of conflict processing. *Frontiers in Human Neuroscience, 7*, 215.

Wang, C. A., Boehnke, S. E., Itti, L., & Munoz, D. P. (2014). Transient pupil response is modulated by contrast-based

saliency. *The Journal of Neuroscience, 34*(2), 408–417.

Wang, C. A., & Munoz, D. P. (2015). A circuit for pupil orienting responses: Implications for cognitive modulation of pupil size. *Current Opinion Neurobiology, 33*, 134–140.

Wehebrink, K. S., Koelkebeck, K., Piest, S., de Dreu, C. K. W., & Kret, M. E. (2018). Pupil mimicry and trust - Implication for depression. *Journal of Psychiatric Research, 97*, 70–76.

Wendt, D., Koelewijn, T., Ksiazek, P., Kramer, S. E., & Lunner, T. (2018). Toward a more comprehensive understanding of the impact of masker type and signal-to-noise ratio on the pupillary response while performing a speech-in-noise test. *Hearing Research, 369*, 67–78.

Wendt, M., Kiesel, A., Geringswald, F., Purmann, S., & Fischer, R. (2014). Attentional adjustment to conflict strength: Evidence from the effects of manipulating flanker-target SOA on response times and prestimulus pupil size. *Experimental Psychology, 61*(1), 55–67.

Are pupils the window of our mind? Pupil-related application in psychology and pupillometry

YANG Xiaomeng; WANG Fuxing; WANG Yanqing;
ZHAO Tingting; GAO Chunying; HU Xiangen

(*School of Psychology, Central China Normal University, Wuhan* 430079, *China*)

Abstract: Over the past few years, pupillometry is proliferation in psychological studies and eye tracking measurement. Pupil size or diameter can reflect mental activities, and affect other's feeling and decision making. In addition, the sizes of our pupils are also influenced by the top-down processing, such as perception and attention, emotion and motivation, mental effort, social cognition and so on. Studies in pupillometry also found that large pupils give others good impressions (e.g. more attractive, more positive), and· cause more positive behaviors during the interaction (e.g. trust behaviors; honest behaviors). In this paper, we reviewed the relations between pupils and our mind with the pupil's neural mechanisms and the adaptive-gain theory based on previous publications. As an effective eye-tracking parameter, pupil could be measured by eye tracking to explore the inner cognitive processing of our human being. In this paper, controlling interference of unrelated variables (e.g., luminance, gaze position), pupillometry raw data mining (e.g., baseline correction, blink processing), and the selection of pupil indices (e.g., pupil diameter, peak value, oscillations frequency) are also discussed for the future research.

Key words: pupil; pupillometry; top-down processing; neural mechanisms; the adaptive-gain theory